

**МЕТОДЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ В ЗАДАЧЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЧЕЛОВЕКА**

*В.И. Борисов<sup>1</sup>, И.А. Попов<sup>2</sup>, В.С. Кубланов<sup>1</sup>*

*(<sup>1</sup> Уральский федеральный университет, funkyvas@yandex.ru, kublanov@mail.ru;*

*<sup>2</sup> Институт математики и механики УрО РАН, iapopov.imm@gmail.com)*

**METHODS OF NONLINEAR DYNAMICS IN THE ANALYSIS  
OF FUNCTIONAL SYSTEMS OF HUMAN**

*V.I. Borisov, I.A. Popov, V.S. Kublanov*

Традиционно при анализе биомедицинских сигналов принято исследовать информационные параметры их детерминированной и стохастическую составляющих. В последнее время проявляется интерес к изучению хаотических характеристик, которые отражают системные изменения в организме человека.

В настоящей работе приведены результаты исследования сигналов собственного электромагнитного излучения головного мозга и кардиоинтервалограммы. Сделаны сопоставления информационных характеристик этих сигналов, полученных разными методами.

Для регистрации сигналов применялся радиофизический комплекс МРТРС [1], в котором для измерения собственного электромагнитного излучения головного мозга применяется многоканальный СВЧ радиотермограф, обеспечивающий измерение электромагнитного излучения тканей в проекции левого и правого полушарий головного мозга, в полосе частот от 650 до 850 МГц. Одновременная регистрация кардиоинтервалограммы позволяет исследовать вариабельности сердечного ритма (BCP).

В [2] показано, что изменения спектральных характеристик флуктуаций собственного электромагнитного излучения головного мозга человека в диапазоне частот от 0,15 до 0,025 Гц преимущественно отражают динамику транспорта жидкости в межклеточных и внутриклеточных пространствах тканей головного мозга, а в области частот менее 0,025 Гц – термодинамические изменения в них. Анализ BCP является хорошим инструментом для оценки изменений состояния вегетативной нервной системы и нейро-гуморальной регуляции.

Исследования проводились при двух функциональных состояниях пациентов: функциональный покой в горизонтальном состоянии (фон) и пассивная антиортостатическая нагрузка (АОН), при которой производился перевод тела пациента из горизонтального положения в положение с приподнятым на 20° ножным концом. В каждом из функциональных состояний пациенты находились в течение 5 минут. Нозологический статус пациентов определялся клиническими исследованиями в Свердловском областном клиническом психоневрологическом госпитале для ветеранов войн (СОКПП, г. Екатеринбург).

Применение методов фрактального анализа, которые позволяют исследовать изменения иерархического построения организации регуляторных механизмов центральной нервной системы (нейрогенных, гуморальных, метаболических и миогенных) и вегетативной нервной системы, обеспечивающих функционирование системы мозгового кровообращения существенно ограничиваются длиной временного ряда. Для временных рядов меньше 2500 значений возможны сильные искажения фрактальных оценок связанные с сильным воздействием общего тренда [3]. При реальных измерениях на пациентах получение настолько длинных рядов затруднено ограничениями по времени исследования. Чтобы избежать этого в данной работе предлагается метод обработки временных рядов вейвлет-коэффициентов по частотным диапазонам, что позволит проводить анализ полученных сигналов, исключив влияние сверхнизкочастотных колебаний и артефактов измерений.

На первом этапе использовался программный пакет «Вейвлет-анализ биомедицинских сигналов», разработанный Институтом математики и механики УрО РАН. Были получены временные ряды вейвлет-коэффициентов сигналов по следующим частотным окнам: HF – высокочастотный диапазон – 0,4–0,15 Гц; и LF – низкочастотный диапазон – 0,15–0,04 Гц.

На втором этапе для полученных временных рядов HF и LF рассчитывались размерность фазового пространства (РФП), показатель Херста (ПХ) и корреляционная размерность (КР) при помощи программы «Фрактан», разработанной Институтом Математических проблем биологии РАН (г. Пущино) [4].

В таблице 1 представлены фрактальные характеристики временных рядов вейвлет-коэффициентов HF и LF для практически здорового пациента П.

Таблица 1

| Временной ряд | СВЧ левый канал |       |     | СВЧ правый канал |       |     | ВСП   |       |     |
|---------------|-----------------|-------|-----|------------------|-------|-----|-------|-------|-----|
|               | КР              | ПХ    | РФП | КР               | ПХ    | РФП | КР    | ПХ    | РФП |
| HF фон        | 4,954           | 0,752 | 6   | 4,712            | 0,727 | 7   | 3,666 | 0,681 | 4   |
| HF АОН        | 6,110           | 0,778 | 7   | 5,101            | 0,875 | 7   | 2,727 | 0,797 | 3   |
| LF фон        | 1,993           | 0,823 | 3   | 3,976            | 0,678 | 4   | 2,103 | 0,866 | 4   |
| LF АОН        | 3,484           | 0,826 | 4   | 3,569            | 0,722 | 5   | 2,771 | 0,821 | 4   |

В таблице 2 представлены фрактальные характеристики временных рядов вейвлет-коэффициентов HF и LF для пациента 3. перенесшего инсульт (до курса реабилитации).

Таблица 2

| Временной ряд | СВЧ левый канал |       |     | СВЧ правый канал |       |     | ВСП   |       |     |
|---------------|-----------------|-------|-----|------------------|-------|-----|-------|-------|-----|
|               | КР              | ПХ    | РФП | КР               | ПХ    | РФП | КР    | ПХ    | РФП |
| HF фон        | 6,440           | 0,646 | 10  | 5,144            | 0,750 | 8   | 4,637 | 0,723 | 8   |
| HF АОН        | 5,609           | 0,841 | 9   | 5,781            | 0,657 | 8   | 3,869 | 0,921 | 6   |
| LF фон        | 4,984           | 0,628 | 5   | 3,159            | 0,779 | 4   | 2,852 | 0,849 | 4   |
| LF АОН        | 3,185           | 0,728 | 6   | 2,977            | 0,646 | 3   | 2,754 | 0,792 | 5   |

В таблице 3 представлены фрактальные характеристики временных рядов вейвлет-коэффициентов HF и LF для пациента 3. после курса реабилитации в СОКПГ.

Таблица 3

| Временной ряд | СВЧ левый канал |       |     | СВЧ правый канал |       |     | ВСП   |       |     |
|---------------|-----------------|-------|-----|------------------|-------|-----|-------|-------|-----|
|               | КР              | ПХ    | РФП | КР               | ПХ    | РФП | КР    | ПХ    | РФП |
| HF фон        | 4,846           | 0,614 | 5   | 2,969            | 0,757 | 3   | 3,420 | 0,516 | 12  |
| HF АОН        | 3,591           | 0,692 | 4   | 4,575            | 0,654 | 5   | 5,651 | 0,701 | 10  |
| LF фон        | 3,803           | 0,858 | 5   | 2,734            | 0,777 | 3   | 2,969 | 0,761 | 6   |
| LF АОН        | 4,139           | 0,688 | 6   | 2,730            | 0,580 | 3   | 2,589 | 0,787 | 4   |

Анализ данных в таблицах 1-3 свидетельствует о том, что временные ряды вейвлет-коэффициентов HF и LF сигналов СВЧ и ВСП имеют персистентный характер. Для различных состояний пациентов (норма, болезнь, реабилитация) изменения РФП, ПХ и КР можно рассматривать в качестве индикаторов изменения состояний регуляторных механизмов функциональных систем человека.

### Литература

1. Кубланов В.С. Радиофизический комплекс для функциональных исследований головного мозга // Медицинская техника. 2009. №3. С. 10-15.
2. Кубланов В.С., Седельников Ю.Е., Азин А.Л., Сысков А.М. Природа флуктуаций собственного электромагнитного излучения головного мозга //Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. №9. С. 45-54.
3. Федер Е. Фракталы // Москва: Мир, 1991. 179 с.
4. Сайт ИМПБ РАН <http://www.impb.ru/files.php>.